

В.И. КОЛОСОВ, НПП «Импульс»;

В.И. ГУБАРЬ, д-р техн. наук, НТУ «КПИ»

ПОГРЕШНОСТИ ПЕРЕДАЧИ СРЕДНЕКВАДРАТИЧЕСКОГО НАПРЯЖЕНИЯ СОЕДИНИТЕЛЬНЫМ КАБЕЛЕМ ВОЛЬТМЕТРА

Проаналізовані похибки при передачі середньоквадратичної напруги гармонійних та спектрально насичених сигналів через з'єднуючий кабель вольтметрів. Показано, що ці похибки обумовлені відхиленням вихідного опору об'єкта вимірювання від хвильового опору кабелю і можуть в декілька разів перевищувати основну похибку вимірювань вольтметрів. Результати аналізу рекомендовано використовувати при нормуванні похибок, а також для оцінки додаткової похибки вимірювань в умовах реальної експлуатації вольтметрів.

It was analysed errors at a transmission of root mean square voltage harmonic and spectrally saturated signals through the connection cable of voltmeters. Is shown, that these errors is conditioned by rejection of measuring object output resistance from cable wave resistance and may in once or twice exceed basic error of measuring of voltmeters. Results of analyses are recommended to use for setting of errors norms and also for evaluation addition error measurement in the conditions of the real exploitation of voltmeters.

Постановка задачи. Передача измеряемого сигнала от объекта ко входу вольтметра среднеквадратического напряжения (СКН) посредством соединительного кабеля сопровождается погрешностью, обусловленной искажением спектра сигнала амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ) кабеля.

При испытаниях и поверке вольтметров при выпуске их из производства погрешность передачи кабелем СКН учитывается в общей погрешности измерений в условиях равенства (т.е. согласования) выходного сопротивления Z_i источника испытательных сигналов (калибратора) волновому сопротивлению соединительного кабеля Z_c .

Однако в реальных условиях эксплуатации из-за отличия выходного сопротивления объекта измерения от волнового сопротивления соединительного кабеля ($Z_i \neq Z_c$) возникает так называемая погрешность рассогласования, которая зависит от соотношения указанных сопротивлений Z_i / Z_c , частоты и спектрального состава измеряемого напряжения.

Выходное сопротивление объекта измерения следует рассматривать как неинформативный параметр, влияние которого обусловлено взаимодействием средства измерения (вольтметра) с объектом измерения [1].

Анализ предыдущих исследований. Погрешность, обусловленная рассогласованием соединительного кабеля вольтметра СКН рассматривалась в работе [2]. Эта погрешность вносит существенный вклад в общую погрешность измерений вольтметров СКН среднечастотного диапазона с

верхней границей 5-30 МГц и при этом имеет скрытый характер. Вместе с тем, погрешности рассогласования анализировались без учета реальных форм АЧХ вольтметров, что не позволяло определить предельное частотное положение спектрально насыщенных сигналов и, соответственно, оценку количественного уровня этих погрешностей.

Цель работы. Состоит в исследовании влияния степени и направления рассогласования со стороны объекта измерения на погрешность передачи соединительным кабелем СКН гармонических и спектрально насыщенных сигналов с учётом реальных форм АЧХ вольтметров.

Результаты работы. Форма АЧХ кабеля, как линии передачи с распределёнными параметрами (рис. 1), определяется характером полных сопротивлений источников сигнала (объекта) Z_i и нагрузки (входного импеданса вольтметра: R_{in} , C_{in}) и способна в значительной степени деформироваться в зависимости от рассогласования на входе и выходе кабеля по отношению к его волновому сопротивлению Z_c [3].

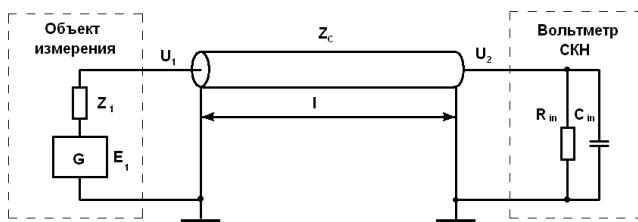


Рис. 1. Передача измеряемого сигнала ко входу вольтметра посредством соединительного кабеля

В общем случае погрешность рассогласования отрезка кабеля определяется через отношение СКН сигналов на выходе кабеля (входе вольтметра) соответственно при рассогласованном ($Z_i \neq Z_c$) и согласованном ($Z_i = Z_c$) значении выходного сопротивления объекта измерения и фиксированном значении СКН входного сигнала:

$$\delta_p = \frac{U_2(Z_i)}{U_2(Z_c)} - 1 = \frac{K_{rms}(Z_i)}{K_{rms}(Z_c)} - 1, \quad (1)$$

где $U_2(Z)$ - СКН сигнала на выходе кабеля; $K_{rms}(Z)$ - коэффициент передачи СКН сигнала через кабель.

Проведем далее оценку этой погрешности при передаче гармонических и спектрально насыщенных сигналов.

1. Передача гармонических сигналов.

Комплексный коэффициент передачи кабеля, рассматриваемого как

линия с распределенными параметрами, определяется выражением [3]:

$$\dot{K}(j\omega) = \frac{e^{-\gamma \ell l}}{1 + \dot{P}_1 \dot{P}_2 e^{-2\gamma \ell l}} \frac{2}{\left(1 + \frac{\dot{Z}_i}{Z_c}\right) \left(1 + \frac{Z_c}{\dot{Z}_i}\right)} \quad (2)$$

где $\dot{P}_1 = \frac{Z_c - \dot{Z}_i}{Z_c + \dot{Z}_i}$; $\dot{P}_2 = \frac{\dot{Z}_2 - Z_n}{\dot{Z}_2 + Z_n}$ - комплексные коэффициенты отражения по входу и выходу линии; $\gamma = \alpha + j\beta$ - коэффициент распространения; α - коэффициент затухания; $\beta = \omega \sqrt{\varepsilon}/c$ - коэффициент фазы; ℓ - длина соединительного кабеля; $\omega = 2\pi f$ - круговая частота.

Считаем, что отрезок линии работает при следующих условиях:

- линия нагружена на комплексное сопротивление Z_2 , состоящее из входного сопротивления R_{in} и емкости C_{in} вольтметра;
- вход линии подключен к источнику сигнала с активным выходным сопротивлением Z_i
- вдоль линии имеются распределенные потери ($\alpha = 0,03$ дБ/м).

Для этих условий работы после преобразования выражения (2) получим модуль комплексного коэффициента передачи:

$$|K(\omega, Z)| = \frac{(1 + P_1) \exp(-\alpha \ell)}{2} \sqrt{\frac{1 + 2P_2 \cos \psi_2 + P_2^2}{1 + 2P_1 P_2 \exp(-2\alpha \ell) \cos(\psi_2 - 2\beta \ell) + P_1^2 P_2^2 \exp(-4\alpha \ell)}} \quad (3)$$

где $P_2 = \frac{\sqrt{(a^2 - Z_c^2 + b^2)^2 + 4Z_c^2}}{(a + Z_c)^2 + b^2}$; $\psi_2 = \arctg \left(-\frac{2bZ_c}{a^2 - Z_c^2 + b^2} \right)$ - модуль и фаза комплексного коэффициента отражения по выходу линии;

$a = \frac{R_{in}}{1 + (\omega R_{in} C_{in})^2}$; $b = \frac{R_{in}^2 C_{in}}{1 + (\omega R_{in} C_{in})^2}$ - активная и реактивная составляющие полного сопротивления нагрузки.

На рис. 2 приведены кривые АЧХ, построенные по выражению (3) при различной степени рассогласования со стороны объекта измерения для кабеля с волновым сопротивлением $Z_c = 50$ Ом, длиной 1 м, который нагружен на импеданс $R_{in} = 1$ МОм, $C_{in} = 30$ пФ.

Из семейства кривых видно, что рассогласование приводит к существенной деформации АЧХ передачи и возникновению либо периодических резонирующих пиков (при $Z_i < Z_c$) либо ослабляющих провалов (при $Z_i > Z_c$). Эти видоизменения АЧХ определяют соответствующие искажения спектра передаваемых сигналов.

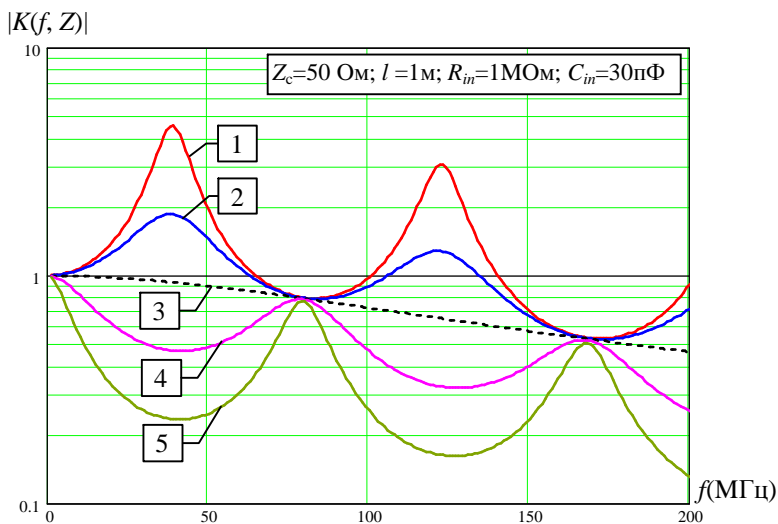


Рис. 2. Деформация АЧХ соединительного кабеля при рассогласовании: 1 – $Z_i/Z_c=0,2$; 2 – $Z_i/Z_c=0,5$; 3 – $Z_i/Z_c=1$; 4 – $Z_i/Z_c=2$; 5 – $Z_i/Z_c=4$

Для синусоидальных сигналов погрешность рассогласования согласно выражению (1) определяется через коэффициент передачи (3):

$$\delta_{p \sin} = \frac{|K(\omega, Z_i)|}{|K(\omega, Z_c)|} - 1 \quad (4)$$

Кривые погрешности рассогласования, рассчитанные по (4) для кабеля длиной 1 м с волновым сопротивлением 50 Ом, нагруженного на типовое значение входного импеданса вольтметра $R_{in} = 1 \text{ МОм}$, $C_{in} = 30 \text{ пФ}$, представлены на рис. 3 и рис. 4.

Особенность влияния рассогласования состоит в том, что погрешность принимает разнополярные значения: положительные при $Z_i/Z_c < 1$ и отрицательные – при $Z_i/Z_c > 1$. Тем самым дополнительная погрешность рассогласования может увеличивать или уменьшать общую погрешность измерения в зависимости от знака собственной погрешности вольтметра.

Как видно из рис. 3, влияние частоты f_{\sin} гармонического сигнала усиливается при увеличении степени рассогласования.

Влияние соотношения сопротивлений Z_i/Z_c таково (рис. 4), что при $Z_i/Z_c > 1$ нарастание погрешности рассогласования происходит неограниченно и значительно быстрее, чем при $Z_i/Z_c < 1$, где значение погрешности стремится к некоторому пределу.

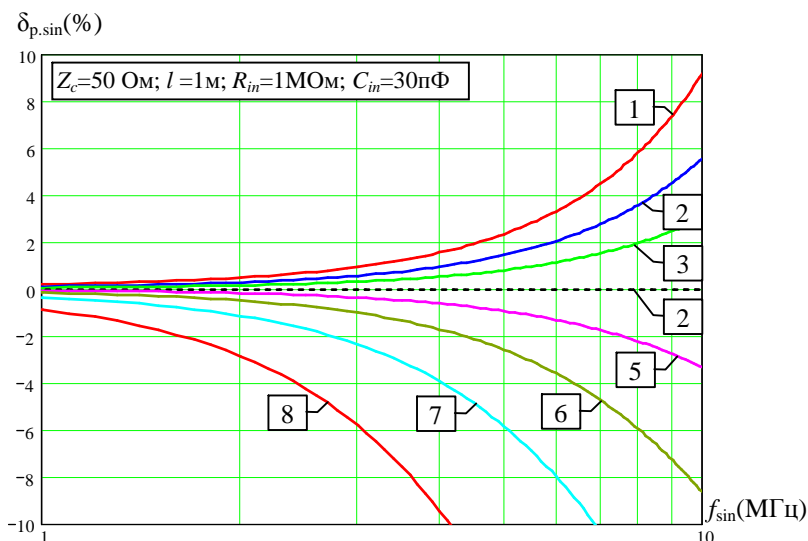


Рис. 3. Влияние частоты гармонического сигнала на погрешность рассогласования соединительного кабеля: 1 – $Z_i/Z_c=0,1$; 2 – $Z_i/Z_c=0,6$; 3 – $Z_i/Z_c=0,8$; 4 – $Z_i/Z_c=1$; 5 – $Z_i/Z_c=1,2$; 6 – $Z_i/Z_c=1,5$; 7 – $Z_i/Z_c=2$; 8 – $Z_i/Z_c=3$

Поэтому в условиях скрытого характера погрешности рассогласования следует избегать проведения измерений при ожидаемых значениях $Z_i/Z_c > 1$.

Количественное сравнение значений погрешности рассогласования и собственной погрешности вольтметра выявляет возможное преобладание первых. Например, при передаче через кабель с $Z_c = 50 \text{ Ом}$ сигнала с частотой 10 МГц от объекта измерения с выходным сопротивлением $Z_i = 75 \text{ Ом}$ ($Z_i/Z_c = 1,5$) возникает дополнительная погрешность рассогласования $\delta_{p, \sin} = -9\%$, в то время как собственная погрешность вольтметра типа ВКЗ-64 на этой частоте составляет $\pm 4\%$ [4].

2. Передача спектрально насыщенных сигналов.

При передаче через соединительный кабель спектрально насыщенных сигналов погрешность рассогласования (1) определяется выражением:

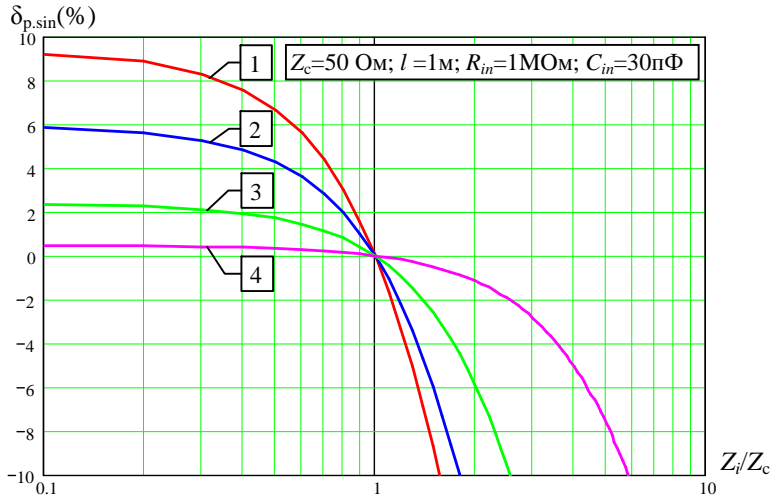


Рис. 4. Влияние выходного сопротивления объекта измерения на погрешность рассогласования соединительного кабеля при гармоническом сигнале:

1 – $f_{\sin} = 10 \text{ МГц}$; 2 – $f_{\sin} = 8 \text{ МГц}$; 3 – $f_{\sin} = 5 \text{ МГц}$; 4 – $f_{\sin} = 2 \text{ МГц}$

$$\delta_{p.sp} = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^{\infty} |S(n\omega_1)|^2 |K(n\omega_1 Z_i)|^2}{\sum_{n=1}^{\infty} |S(n\omega_1)|^2 |K(n\omega_1 Z_c)|^2}} - 1 \quad (5)$$

где $|S(n\omega_1)|$ - модуль дискретного спектра периодического сигнала; $|K(n\omega_1 Z)|$ - модуль комплексного коэффициента передачи (3) в дискретных точках $n = 1, 2, 3, \dots$

Данную погрешность рассогласования имеет смысл исследовать только в том частотном диапазоне измеряемых сигналов, в котором это допускается возможностями непосредственно вольтметра, то есть до частот, где погрешности, обусловленные искажением спектра (в основном в его канале масштабного преобразования), не превышают установленные нормы.

Чтобы дать оценку максимально возможной погрешности рассогласования, в расчете на предполагаемую произвольность формы (и спектра) измеряемого сигнала, установим следующие условия.

Считаем, что через кабель ко входу вольтметра передается сигнал с наиболее широкополосным спектром, причем его первая гармоника занимает такое максимальное частотное положение $f_{1.sp}$, при котором возникающая

непосредственно в вольтметре (без кабеля) частотная погрешность $\delta_{f_{sp}}$ равна предельно допустимому значению погрешности $\delta_{f_{\sin}}$, установленному для верхней границы рабочей области частот $f_{\delta \cdot \sin}$ на гармоническом сигнале.

К наиболее широкополосным относится сигнал прямоугольной формы, для которого свойственна наименьшая скорость убывания амплитудных значений гармоник дискретного спектра с ростом их частоты [5].

Теоретическая взаимосвязь между частотой первой гармоники прямоугольного сигнала $f_{1 \cdot sp}$ и частотой верхней границы рабочей области вольтметра для гармонического сигнала $f_{\delta \cdot \sin}$ может быть установлена только после выяснения предполагаемой формы АЧХ канала масштабного преобразования вольтметра.

На рис. 5 представлены экспериментальные кривые реальных АЧХ вольтметров СКН некоторых типов. Здесь же для сравнения приведена теоретическая кривая АЧХ 2-го порядка.

Сопоставление характеристик показывает, что реальные АЧХ имеют порядок выше второго. Поэтому аналитическое описание АЧХ 2-го порядка может служить описанием предельного положения реальных АЧХ, поскольку допускает более высокую частоту следования измеряемых импульсных сигналов.

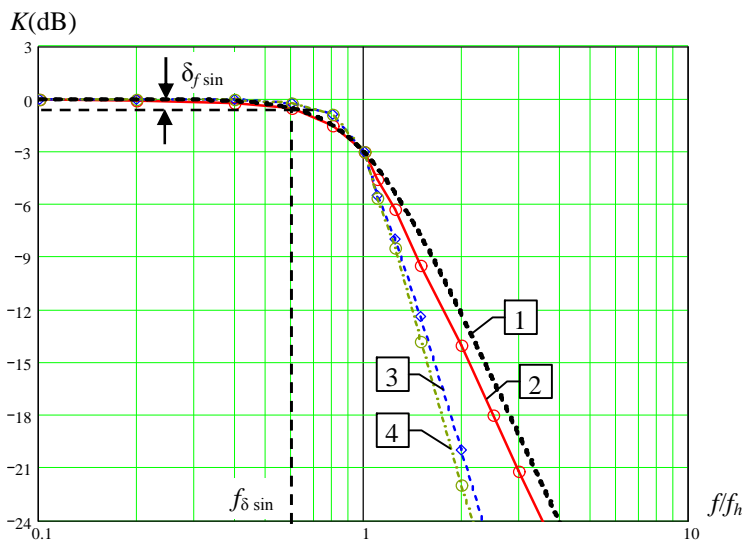


Рис. 5. Нормированные АЧХ: 1 - теоретическая 2-го порядка; экспериментальные вольтметров СКН: 2 - ВЗ-40 ($f_h = 10,5$ МГц); 3 - ВЗ-57 (ФНЧ выкл. $f_h = 12,4$ МГц); 4 - ВЗ-48 ($f_h = 70$ МГц)

Частотная погрешность при передаче гармонического сигнала через канал с АЧХ 2-го порядка [5]:

$$\delta_{f \sin} = \frac{1}{\sqrt{1 + (f_{\delta \sin} / f_h)^4}} - 1 \quad (6)$$

где f_h - частота среза АЧХ на уровне -3dB .

Частотная погрешность при передаче прямоугольного сигнала через канал с АЧХ 2-го порядка [6]:

$$\delta_{f \text{ sp}} = -\frac{f_1}{4\sqrt{2} \pi f_h \alpha (1-\alpha)} \quad (7)$$

где α - коэффициент заполнения импульсов прямоугольного сигнала.

Решая совместно (6),(7) при $\delta_{f \sin} = \delta_{f \text{ sp}} = \delta_f$, получим выражение для максимального значения частоты первой гармоники прямоугольного сигнала, передаваемого через соединительный кабель:

$$f_{1 \text{ sp max}} = \frac{4\sqrt{2}\pi\alpha(1-\alpha)f_{\delta \sin}}{\sqrt[4]{\frac{1}{1+\delta_f}} - 1} \quad (8)$$

На рис. 6 и рис. 7 представлены кривые погрешности рассогласования при передаче прямоугольного сигнала, рассчитанные с помощью программы Mathcad по выражению (5) для значений частоты $f_{\delta \sin}$ верхней границы рабочей области вольтметров, соответственно 5 МГц ($\delta_f = -4\%$) и 10 МГц ($\delta_f = -6\%$).

При расчете использовались параметры коаксиального кабеля и его нагрузки, приведенные на поле рисунков, а частота повторения сигнала $f_{1 \text{ sp}}$ определялась из выражения (8). На этих же рисунках приведены кривые погрешности рассогласования при передаче гармонического сигнала.

Из кривых видно, что в области рассогласования $Z_i/Z_c < 1$ большую погрешность вызывает сигнал прямоугольной формы, а в области $Z_i/Z_c > 1$ - гармонический сигнал. При более чем двухкратном отклонении выходного сопротивления объекта измерения от волнового сопротивления кабеля погрешность рассогласования превышает собственную погрешность вольтметра и при этом остается скрытой в процессе измерения.

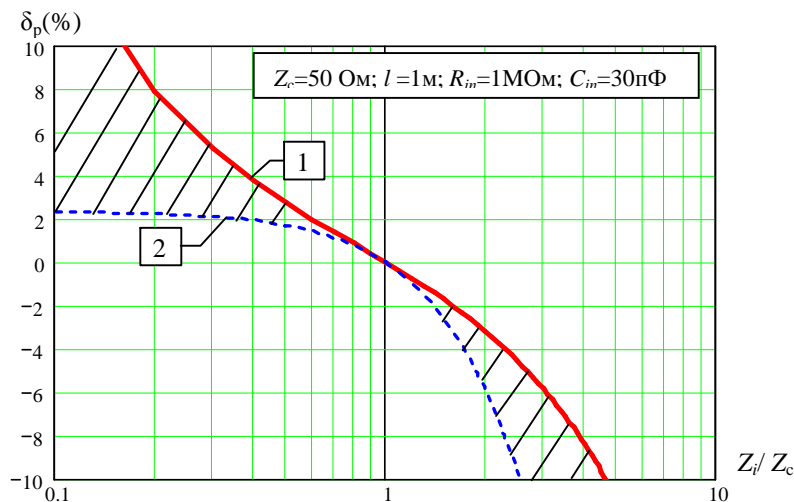


Рис. 6. Погрешности рассогласования соединительного кабеля при передаче сигналов:
 1- прямоугольного $f_{1sp} = 1,645 \text{ МГц}$, $\alpha = 0,5$;
 2 – гармонического $f_{\delta \sin} = 5 \text{ МГц}$, $\delta_f = -4\%$

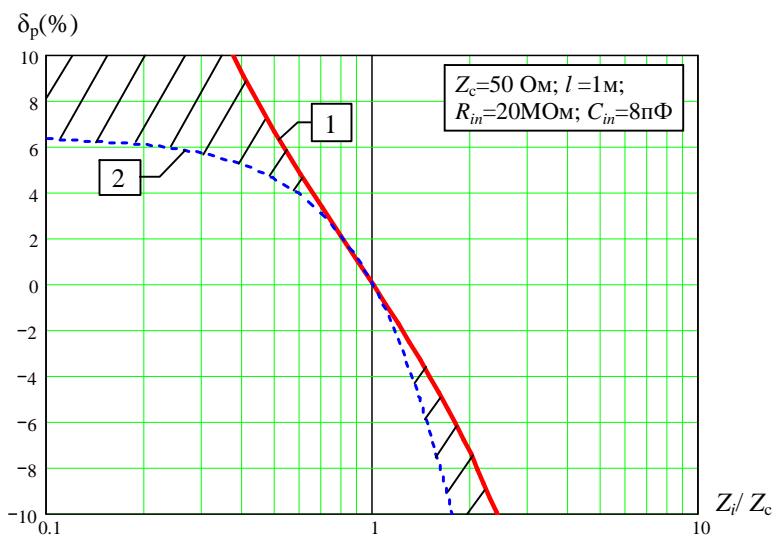


Рис. 7. Погрешности рассогласования соединительного кабеля при передаче сигналов:
 1- прямоугольного $f_{1sp} = 6,4 \text{ МГц}$, $\alpha = 0,5$;
 2 – гармонического $f_{\delta \sin} = 10 \text{ МГц}$, $\delta_f = -6\%$

У низкочастотных ($f_{\delta \cdot \sin} < 100$ кГц), но более точных (с основной погрешностью 0,1- 1 %) вольтметров в качестве средства подсоединения к объекту измерения используется двухпроводная линия с волновым сопротивлением $Z_i = 300$ Ом.

Графические зависимости погрешности рассогласования при передаче через такую двухпроводную линию (длина 1м, нагружена на типовой входной импеданс вольтметра $R_{in} = 1$ МОм, $C_{in} = 60$ пФ) гармонического и прямоугольного сигналов представлены на рис.8. Эти зависимости отличаются от аналогичных зависимостей для коаксиального кабеля тем, что наиболее сильное влияние рассогласования сосредоточено в области $Z_i/Z_c > 1$. Так, например, при выходном сопротивлении объекта $Z_i = 1,8 \dots 3$.кОм ($Z_i/Z_c = 6 \dots 10$) погрешность рассогласования достигает 1-2% и превышает основную погрешность прибора.

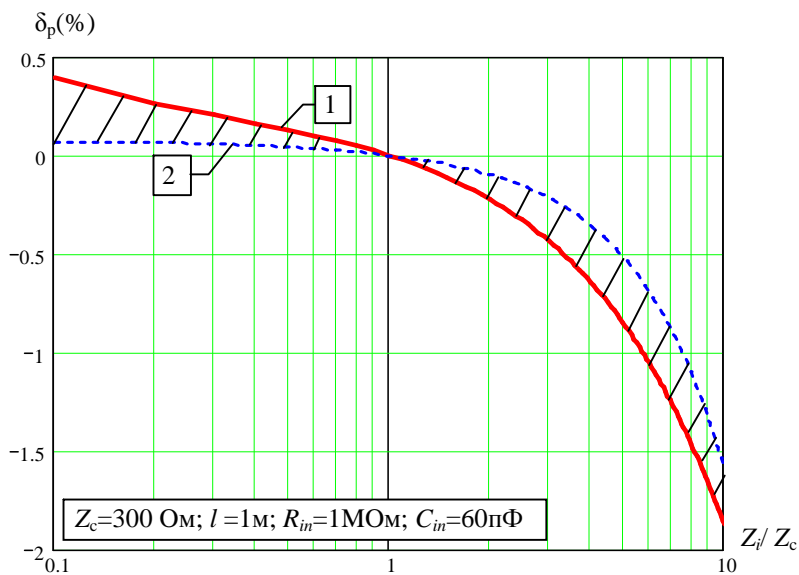


Рис. 8. Погрешности рассогласования соединительного кабеля при передаче сигналов:

- 1 - прямоугольного $f_{1.sp} = 33$ кГц, $\alpha = 0,5$;
- 2 - гармонического $f_{\delta \sin} = 100$ кГц, $\delta_f = -1\%$

Теперь обратимся к вопросу об оценке границ погрешности рассогласования для всего разнообразия форм сигналов, охватываемых

термином “произвольная форма”.

Совершенно очевидно, что спектр сигналов произвольной формы содержит не менее одной гармоники и, вместе с тем, его полоса остается не шире, чем полоса спектра прямоугольного сигнала. Поэтому можно полагать, что значение погрешности рассогласования при передаче сигналов произвольной формы лежит в пределах заштрихованной области, ограниченной кривыми для сигналов синусоидальной и прямоугольной форм на рис. 6-8.

Выводы. Полученные в результате исследования графические зависимости позволяют оценить погрешности рассогласования для гармонических и спектрально насыщенных сигналов.

Более сильное влияние степени рассогласования наблюдается когда выходное сопротивление объекта измерения превышает волновое сопротивление соединительного кабеля.

Погрешность рассогласования может превышать собственную погрешность вольтметра при измерении СКН как гармонических так и спектрально насыщенных сигналов.

При измерении СКН сигналов неизвестной (произвольной) формы погрешность рассогласования может быть дана в виде оценки “сверху”, в качестве которой принимается погрешность рассогласования для прямоугольного сигнала.

Отмеченные особенности влияния рассогласования соединительного кабеля могут учитываться при нормировании погрешностей, а также при проведении измерений в условиях эксплуатации, для чего целесообразно погрешность рассогласования приводить в нормативно-технической документации на вольтметры СКН.

Список литературы: 1. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений: *ГОСТ 8.009-84 (2003). ГСИ.* - [Чинний від 1986-01-01].- М.: Изд-во стандартов, 1984. - 42 с. 2. *Петрищев А.А., Колосов В.И.* Об оценке погрешности рассогласования при измерениях напряжения сигналов сложных форм //Опыт, результаты, проблемы: Повышение конкурентоспособности радиоэлектронной аппаратуры: Сб. статей.- Таллинн: Валгус, 1988. - Вып. 5. - С. 66-73. 3. *Заездный А.М.* Гармонический синтез в радиотехнике и электросвязи. - Л.: Энергия, 1972. - 528 с. 4. *Микровольтметр ВКЗ-64.* Технические условия. ЯЫ2. 710.085 ТУ. 5. *Гоноровский И.С.* Радиотехнические цепи и сигналы. - 4-е изд., - М.: Радио и связь, 1986. - 512 с. 6. *Колосов В.И.* Оценка укладываемости энергетического спектра сигналов в рабочую область частот измерительного тракта //Системы контроля параметров радиоэлектронных устройств и приборов: респ. науч.-техн. конф., Секц.2: тезисы докл. К., 1988. - С. 46-48.

Поступила в редколлегию 14.07.2008